NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. G. LIPPMANN,

MAITRE DE CONFÉRENCES A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

1872-1882



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1882

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. G. LIPPMANN.

I.

PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE.

De 1872 à 1882, M. Lippmann s'est occupé de diverses questions de Physique. On ne décrira pas dans ce qui suit les méthodes employées, dont quelques-unes étaient nouvelles; on se bornera à indiquer les sujets traités et les résultats obtenus.

1. *Relations entre les phénomènes électriques et capillaires.*

L'étude des phénomènes capillaires est restée longtemps un chapitre isolé de la Physique. En 1873, M. Lippmann, conduit en partie par des idées préconçues sur le mécanisme de la contraction musculaire, a découvert des faits et des lois qui établissent un lien étroit entre les phénomènes électriques et capillaires, et il en a fait une étude expérimentale et mathématique complète.

D'une part, l'électricité agit sur les phénomènes capillaires. Du mercure étant en contact avec de l'acide sulfurique étendu, on sait

que la forme d'équilibre de sa surface est déterminée par la valeur de A, A étant la constante capillaire ou le coefficient qui entre dans la formule bien connue de Laplace

$$p = A\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$$

Quant aux conditions de l'équilibre électrique, elles dépendent de la différence de potentiel x, qui existe entre les deux liquides qui se touchent. Or M. Lippmann a montré que A est une fonction continue de x. Par deux méthodes expérimentales, il a établi cette première loi en mesurant les valeurs de cette fonction.

D'autre part et inversement, on peut, au moyen des forces capillaires, produire de l'électricité : en faisant varier mécaniquement l'aire de la surface du contact, on constate que l'électricité est mise en liberté en quantité proportionnelle à la variation de l'aire. M. Lippmann a en outre montré que cette seconde loi, qui régit une production d'électricité, est à la pression qui régit des mouvements ce que la loi de Lenz est à la loi d'Ampère; il a montré par le calcul que la quantité d'électricité mise en liberté est égale (en unités absolues) à la variation de surface multipliée par la dérivée de A par rapport à x.

Entre autres appareils destinés à mettre en évidence ces deux séries de phénomènes réciproques, M. Lippmann a construit un *moteur électrocapillaire réversible*. Mis en communication avec les pôles d'un élément Daniell, cet appareil se met à tourner et à fournir une quantité de travail indéfinie, si l'on a soin de renouveler la pile. Inversement, si l'on en fait tourner le volant à la main, le même appareil fournit un courant électrique dans un fil placé entre ses pôles, et il fonctionne comme source d'électricité. Ce moteur a un rendement qui peut atteindre l'unité; il est théoriquement parfait.

Comme application de la première loi, M. Lippmann a construit l'*électromètre capillaire*, dont l'usage commence à être répandu, à cause de la précision et de l'instantanéité de ces indications. Cet instrument donne le $\frac{1}{10000}$ de daniell; en outre, l'index de mercure suit sans oscillations propres les variations électriques les plus rapides. Les physiologistes s'en sont servis pour étudier les mouvements électriques qui accompagnent ou, pour mieux dire, qui précèdent le fonctionnement

du nerf ou du muscle. C'est ainsi que M. Marey l'a employé, avec l'aide de la photographie, pour fixer la forme de la variation électrique des muscles et pour décomposer en ses éléments le phénomène complexe de la décharge du gymnote, laquelle comprend jusqu'à 1400 oscillations par seconde. M. Burdett-Sanderson, à l'Institution royale de Londres, l'a employé à étudier les phénomènes de l'électricité végétale et à les montrer par projection.

Le son n'étant qu'un mouvement, il suffit d'intercaler un électromètre capillaire à l'extrémité d'une ligne téléphonique pour l'entendre reproduire la parole articulée, ainsi que l'a fait voir M. Antoine Bréguet; en vertu de sa réversibilité, l'instrument fonctionne également bien comme récepteur téléphonique; d'après M. le professeur Lovèn, de Stockholm, deux petits électromètres ainsi employés ne sont pas inférieurs à des téléphones ordinaires de Bell. Enfin MM. Root, Hansen, Bouty et autres physiciens ont utilisé l'électromètre capillaire pour diverses recherches de Physique qu'il eût été difficile d'entreprendre sans son secours.

En présentant ce travail d'électrocapillarité comme thèse à la Faculté des Sciences de Paris, en 1875, M. Lippmann l'a complété par une théorie mathématique complète des faits qu'il y a indiqués : il a établi les équations qui régissent aussi bien le phénomène direct que son inverse, et il a montré que ces phénomènes sont reliés entre eux par une relation tirée du principe de la conservation de l'énergie.

2. *Étude des propriétés physiques d'une surface de mercure mise en contact de différentes solutions aqueuses.*

Lorsqu'un métal est mis en contact de l'eau distillée et qu'on ajoute à ce liquide des substances incapables de produire une action chimique, ou prises en si petites quantités que l'on n'aperçoive aucune action, les propriétés physiques de la surface sont modifiées, et elles peuvent l'être au maximum, c'est-à-dire autant qu'en présence de l'action chimique la plus violente : la force électromotrice de contact varie d'environ 1 daniell, la constante capillaire du simple au double.

Le mercure se prêtait particulièrement à cette recherche, parce qu'il est facile de le purifier et de lui incorporer des métaux étrangers;

de plus, étant liquide, il est dans un état physique constant, et l'on peut mesurer sa constante capillaire. M. Lippmann a constaté que l'on ne peut pas conclure toujours de la nature chimique des corps employés à l'action physique qu'ils produisent. Ainsi, bien que tous les corps réducteurs agissent dans le même sens, une trace d'acide chlorhydrique, iodhydrique ou bromhydrique agit sur le mercure bien plus énergiquement qu'une quantité, si grande qu'elle soit, d'acide sulfureux; de sorte que, en ajoutant à une dissolution chargée d'acide sulfureux une trace d'iode, on augmente considérablement l'action du corps réducteur, à cause de l'acide iodhydrique qui prend naissance. On observe encore que l'acide chromique, même en traces minimes, exerce une action électromotrice plus énergique sur le platine que sur le mercure, bien que ce dernier métal paraisse seul attaqué. Par contre, une loi apparaît si l'on compare entre elles les variations simultanées de la constante capillaire et de la force électromotrice; la première de ces variables dépend uniquement de la seconde. L'expérience montre que la relation qui les lie est indépendante de la nature du liquide et des métaux employés.

3. *Étude optique des surfaces métalliques polarisées.*

En immergeant des miroirs métalliques dans différents liquides et en employant tantôt la méthode des anneaux, tantôt l'appareil de M. Jamin, pour l'étude de la réflexion métallique, M. Lippmann a constaté l'invariabilité des propriétés optiques du métal. Lors même qu'on le polarise par un courant ou que l'on ajoute divers réactifs à l'eau qui baigne la surface, le retard dû à la réflexion et la différence de phase des composantes principales demeurent invariables.

4. *Sur la dépolarisation d'un métal dans ses propres dissolutions.*

Un fil de cuivre relié à un électromètre peut servir en quelque sorte de réactif pour déceler la présence d'un sel de cuivre au sein d'une liqueur : si le fil se montre impolarisable, il y a un sel de cuivre; s'il est polarisable, il n'y en a pas. De même l'argent métallique peut servir

de réactif aux sels d'argent, etc. M. Lippmann a montré d'ailleurs que cette méthode d'analyse électrique est dans certains cas très sensible; elle a surtout l'avantage d'être presque instantanée.

5. *Action des écrans magnétiques sur les phénomènes d'induction.*

On sait qu'une masse de fer doux intercepte l'action d'un aimant. Il se produit une sorte d'ombre magnétique, due à ce que le magnétisme induit sur le fer doux agit en sens contraire de l'aimant et compense son action. Mais M. Lippmann a constaté que, si l'aimant tourne sur lui-même, il produit les mêmes courants d'induction que si l'écran n'existait pas. Cela prouve que dans l'ombre magnétique le champ électrique n'est pas nul en réalité; il est formé de deux champs magnétiques égaux et de sens contraires : leurs actions sur une aiguille aimantée se détruisent exactement; mais il n'en est pas de même de leurs actions sur un circuit induit, parce que l'un des champs, étant immobile, n'agit pas, tandis que l'autre, mobile, exerce son action. De là aussi des conséquences pratiques relatives à la construction des machines magnéto-électriques.

6. *Méthode pour la mesure de la résistance des liquides.*

On sait que la mesure de la résistance des liquides présente des difficultés particulières, à cause des phénomènes physiques et chimiques qui ont lieu aux points d'entrée et de sortie du courant.

Diverses méthodes ont été proposées ayant pour but d'éliminer l'effet de ces phénomènes; la méthode proposée par M. Lippmann dispense de les éliminer : elle en est complètement indépendante. Elle consiste à se servir de la différence de potentiel entre deux points A et B pris *sur le trajet* d'une colonne liquide cylindrique pour avoir la résistance de la portion comprise entre les sections droites qui passent par A et B; les points d'entrée et de sortie du courant étant *extérieurs* à cette portion, les complications qui peuvent s'y produire deviennent complètement indifférentes.

7. *Méthodes pour la détermination de l'ohm.*

M. Lippmann a proposé successivement trois méthodes pour la détermination expérimentale de l'ohm. Les deux premières sont fondées sur l'emploi de l'induction par la terre; la première convient aux cas des grandes résistances, la seconde aux cas des petites résistances. Ces deux méthodes ont quelques avantages sur celle qui a été employée par l'Association britannique, en particulier l'avantage de rendre inutile la correction relative à l'extra-courant, et, par conséquent, la détermination très difficile du coefficient de self-induction. La troisième méthode est fondée sur le dégagement de chaleur par le courant. M. Joule avait employé une méthode de ce genre : mais le mode de détermination de M. Joule exige une mesure calorimétrique, ainsi que la connaissance de l'équivalent mécanique de la chaleur, nombre que l'on ne connait pas avec une approximation suffisante pour cet objet.

M. Lippmann a indiqué une méthode qui permet de se passer à la fois de toute mesure calorimétrique et de la connaissance de l'équivalent mécanique de la chaleur.

II.

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE.

---

1. *Action du magnétisme sur l'électricité statique.*

On sait que, avant l'expérience d'Œrstedt, on cherchait si l'aimant exerçait une action particulière sur des corps électrisés. La découverte d'Œrstedt fit oublier ces tentatives, qui durent nécessairement rester

infructueuses, car on ignorait la condition essentielle à leur succès. Aujourd'hui M. Lippmann a pu, par une application convenable du principe de la conservation de l'énergie, prédire une action de ce genre avec certitude et même en calculer *a priori* la grandeur. Le *magnétisme à l'état variable* exerce une action mécanique sur l'électricité statique, c'est-à-dire qu'un aimant qui se déplace, qui tourne sur lui-même ou dont l'intensité varie, exerce à distance une action mécanique sur tout corps électrisé conducteur ou isolant. C'est une sorte d'induction électrique, avec cette différence que ce qui prend naissance n'est point une force électromotrice tendant à déplacer l'électricité dans un corps conducteur, mais une force mécanique appliquée à la masse même du corps. La force appliquée à chaque élément du corps est égale à $\mu\frac{dH}{dt}$, μ étant la charge de l'élément et $\frac{dH}{dt}$ la vitesse de variation de l'intensité du champ magnétique au point considéré, ces grandeurs étant d'ailleurs exprimées en unités électromagnétiques C.G.S. C'est ainsi, en particulier, que le magnétisme terrestre est sans action sur un corps électrisé, mais que les variations de ce magnétisme tendent à déplacer ce corps tangentiellement au parallèle magnétique. Un corollaire curieux de cette théorie, c'est qu'une charge d'électricité statique μ possède une inertie mécanique propre. En effet, si elle se déplace avec une vitesse $\frac{dr}{dt}$, elle crée autour d'elle un champ magnétique d'intensité égale à $\mu\frac{dr}{dt}$; la vitesse de variation de cette intensité magnétique est donc égale à $\mu\frac{d^2r}{dt^2}$ et, par conséquent, l'action mécanique exercée par cette variation sur la charge μ est une force égale à $\mu^2\frac{d^2r}{dt}$ et dirigée en sens inverse de l'accélération. Comme $\frac{d^2r}{dt^2}$ n'est autre chose que l'accélération du mouvement, on voit que cette force joue exactement le rôle de la force d'inertie; seulement l'analogue de la masse n'est pas la charge μ, mais le carré de cette charge.

Ces diverses prévisions n'ont pas encore été soumises à l'expérience. Si l'on traduit en nombres les expressions données plus haut, on trouve que le théorème général pourra se vérifier, mais que la petitesse de μ^2 rend la vérification du corollaire peu probable. On s'explique par la

même raison pourquoi cette inertie propre de l'électricité statique n'a jamais pu être remarquée.

2. *Principe de la conservation de l'électricité.*

Les travaux de Carnot, Clapeyron, Clausius et W. Thomson, qui ont créé la théorie mécanique de la chaleur, sont restés longtemps sans analogues en électricité.

Le principe de Carnot ne peut s'appliquer aux phénomènes purement électriques; cependant il existe un autre principe, auquel M. Lippmann a donné le nom de *conservation de l'électricité*, et qui est l'analogue du principe de Carnot, à un point de vue purement analytique. Si l'on appelle dm la quantité d'électricité reçue par un corps dont l'état varie infiniment peu, on a

$$\int dm = 0,$$

cette intégrale étant étendue à un cycle quelconque fermé et réversible parcouru par le corps; ce qui veut dire, en langage ordinaire, que le corps restitue, pendant une partie du cycle, toute l'électricité qui lui a été fournie pendant le reste du cycle, et, par conséquent, que les quantités d'électricité qui étaient libres avant le parcours du cycle se conservent inaltérées. Sous cette forme, on reconnaît un fait général qui a été souvent implicitement admis, mais dont on n'avait pas tiré parti.

Quant à l'analogie purement analytique mentionnée plus haut, on l'aperçoit en remarquant que l'équation très connue de Clausius

$$\int \frac{dQ}{T} = 0$$

a pour analogue

$$\int \frac{d\varepsilon}{V} = 0,$$

ε représentant l'énergie électrique d'un réservoir d'électricité et V son potentiel; or M. Lippmann montre que, si l'on exprime ces quantités ε et V en fonction de m, on a identiquement

$$\int \frac{d\varepsilon}{V} = \int dm.$$

Afin d'appliquer cette équation $\int dm = 0$ à l'étude des phénomènes réversibles, M. Lippmann remarque qu'elle implique que dm est une différentielle exacte. Si donc on appelle x et y les variables indépendantes qui déterminent l'état du corps, et que l'on ait par conséquent

$$dm = X\,dx + Y\,dy,$$

la condition d'intégrabilité qui exprime le principe de la conservation de l'électricité est la suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial Y}{\partial x}. \tag{1}$$

Afin de traduire en outre, sous forme d'équation, le principe bien connu de la conservation de l'énergie, M. Lippmann emprunte à MM. W. Thomson et Kirchhoff leurs artifices d'analyse, et il montre qu'en appelant $dE = A\,dx + B\,dy$ une variation infiniment petite de l'énergie totale, on a également

$$\frac{\partial A}{\partial y} = \frac{\partial B}{\partial x}. \tag{2}$$

Les équations (1) et (2) sont toujours distinctes, compatibles, et elles constituent les deux équations différentielles générales auxquelles sont soumis tous les phénomènes électriques réversibles.

Divers exemples d'application servent à en mieux montrer le mode d'emploi. Ainsi, en appliquant les équations (1) et (2) au phénomène du pouvoir diélectrique du gaz, démontré par M. Boltzmann, M. Lippmann en conclut l'existence et la grandeur d'un phénomène nouveau, la contractilité électrique du gaz. Sous l'influence de l'électricité statique, un gaz se contracte comme sous l'influence du froid; et, chose remarquable, le coefficient de contractilité électrique est égal au pouvoir réfringent du gaz pour la lumière. M. Quincke a observé en effet la contraction électrique de l'acide carbonique; sir W. Thomson a remarqué le son rendu par l'air d'un condensateur d'OEpinus qu'on charge ou qu'on décharge. Pendant les orages, la grande masse d'air qui enveloppe un nuage orageux, en particulier celle qui va du nuage à la

Terre, se décontracte subitement quand l'étincelle éclate, et contribue ainsi, d'après sir W. Thomson, à produire le bruit du tonnerre.

M. Lippmann donne une série d'autres applications des équations (1) et (2); chacune donne lieu à la prédiction d'un phénomène nouveau; la dernière, relative à la déformation qu'un cristal hémièdre doit subir sous l'influence électrique, a été plus tard vérifiée qualitativement et quantitativement par MM. P. et J. Curie; l'expérience a confirmé le résultat numérique du calcul.

Le nombre des applications de ce genre n'est pas limité; chaque fois qu'on soumettra un phénomène réversible à cette analyse, les équations (1) et (2) feront connaître la loi à la fois du phénomène donné et d'un phénomène nouveau, réciproque du premier.

3. *Théorie des couches doubles de M. Helmholtz. Calcul d'une distance intermoléculaire.*

Dans un travail publié l'année dernière [1], M. Helmholtz a montré que sa théorie bien connue des couches doubles est qualitativement d'accord avec les phénomènes électrocapillaires indiqués au commencement de cette Notice.

M. Lippmann a complété ce travail, en intégrant une équation différentielle que M. Helmholtz s'était borné à discuter; il a pu, par suite, montrer que l'hypothèse de la couche double est numériquement d'accord avec l'expérience.

M. Lippmann calcule comme corollaire la capacité électrique et, par conséquent, l'épaisseur ε de la couche double. Or, d'après la définition même de ces couches, ε est la distance moléculaire qui sépare le mercure de l'eau, lors même que le mercure est touché et mouillé par l'eau.

On a ainsi $\varepsilon = \frac{1}{35\,000\,000}$ de millimètre.

Il est bon de rappeler qu'autrefois sir W. Thomson a trouvé, par une voie toute différente, un résultat du même ordre de grandeur; la distance

(1) *Comptes rendus de l'Académie de Berlin*, novembre 1881.

minima entre le zinc et le cuivre, lorsque ces métaux se touchent, est de $\frac{1}{30\,000\,000}$ de millimètre.

4. *Sur l'établissement du principe de Carnot.*

On a attribué à Carnot une erreur fondamentale qu'il n'a pas commise. Il n'est pas sans intérêt de remarquer, tant au point de vue de la gloire de Carnot que de l'établissement même de la Thermodynamique, que jamais Carnot ne s'est appuyé sur l'indestructibilité du calorique. L'œuvre de Carnot est irréprochable et doit encore servir de fondement à la Science qu'il a créée ; l'erreur qu'on lui attribue injustement est celle de son compromettant disciple Clapeyron. M. Lippmann a cru devoir insister sur ce point dans un article publié par le *Journal de Physique*.

5. *De la théorie capillaire de Gauss et de son extension aux propriétés capillaires des lignes liquides.*

En appliquant le théorème des vitesses virtuelles, Gauss a établi, comme l'on sait, l'équation des phénomènes capillaires. M. Lippmann a montré que la théorie de Gauss peut être exposée simplement et en même temps rendue un peu plus complète. Si l'on désigne par $d\Omega$ la somme des vitesses virtuelles, par S_1, S_2, S_3 les aires des surfaces qui limitent différentes masses liquides, et par L_1, L_2, L_3 les longueurs des lignes qui limitent ces surfaces, on a, d'après la théorie complétée,

$$\begin{aligned} d\Omega = {} & A_1 dS_1 + A_2 dS_2 + \ldots \\ & + B_1 dL_1 + B_2 dL_2 + \ldots. \end{aligned}$$

Les termes de la première ligne sont ceux trouvés par Gauss ; il est donc inutile d'en rappeler la signification. Quant aux termes de la seconde ligne, ils ont une interprétation analogue, mais qui est relative aux lignes et non plus aux surfaces : on peut montrer qu'il en résulte ce que l'on peut appeler les propriétés capillaires des lignes liquides. Ainsi, si une ligne telle que L_1 présente en un point une courbure $\frac{1}{R}$, il en ré-

sulte une force p dirigée suivant la normale principale

$$p = \frac{B_1}{R}.$$

Si trois surfaces liquides se coupent suivant une ligne, le théorème bien connu, relatif aux sinus des angles de raccordement, n'est vrai que si la ligne commune est une droite.

M. Lippmann montre également que la théorie qui attribue au contour inférieur d'une paroi de verre verticale une action soulevante est inadmissible; elle est en contradiction avec la théorie de Gauss, aussi bien qu'avec l'expérience. L'erreur de raisonnement sur laquelle est fondée cette théorie est la suivante : on attribue, avec Laplace, à la surface de verre verticale certaines actions moléculaires, mais on oublie de les attribuer également à la surface de verre qui coupe la première suivant l'arête considérée.

6. *Sur une condition nécessaire d'équilibre d'une surface liquide.*

L'équation de Laplace

$$p = A\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$$

ne suffit pas pour l'équilibre. Il faut y joindre cette condition que la valeur de A soit la même en tous les points de la surface; condition qui, d'ordinaire, est remplie d'elle-même. Cependant, en employant certains liquides hétérogènes ou en faisant intervenir convenablement le courant électrique, on peut faire en sorte que A varie d'une manière continue d'un point à l'autre de la surface. Dans ce cas, cette surface peut encore paraître immobile au premier abord, mais en réalité elle glisse sur elle-même : les différents points qui la constituent possèdent une vitesse tangentielle considérable qui entretient dans le liquide des mouvements plus ou moins violents (tourbillons de Gerboin, phénomènes observés par Sérullas, Paalzow et autres). M. Lippmann fait voir que ces phénomènes, qui ont autrefois exercé la curiosité et la patience des physiciens, peuvent être expliqués et calculés dans tous leurs détails si l'on tient compte de l'inégalité des valeurs de A.

7. *Expression analytique de la température absolue en fonction des propriétés thermiques d'un corps quelconque.*

La propriété essentielle des températures dites absolues, employées en Thermodynamique, est d'être indépendantes du choix d'un corps thermométrique particulier. On en a donné une expression explicite en fonction de la dilatation des gaz parfaits : mais les gaz parfaits ne constituent qu'une classe particulière de corps, lesquels d'ailleurs sont purement fictifs. Le problème qui consiste à exprimer la valeur de la température absolue en fonction des propriétés thermiques d'un corps réel quelconque restait donc à résoudre. M. Lippmann en a donné la solution. S'appuyant sur ce que la valeur de la température absolue jouit des propriétés d'un facteur intégrant, et de ce que cette valeur, d'autre part, peut être considérée comme une fonction de la température marquée par un thermomètre quelconque, il arrive à l'expression suivante :

$$T = T_0 e^{-\int_{x_0}^{x} \frac{\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial x}}{Q} dx}.$$

Dans cette formule, T est la température absolue, T_0 un facteur arbitraire qui s'élimine de lui-même de toutes les formules où entrent ces températures, P et Q sont les coefficients thermiques qui entrent dans l'expression de la quantité de chaleur infinitésimale

$$dQ = P\,dx + Q\,dy;$$

enfin x et y sont deux variables indépendantes et x une fonction arbitraire de la température. M. Lippmann montre que cette expression ne dépend qu'en apparence des valeurs de x prises comme limites. Il l'a d'ailleurs vérifiée en en faisant diverses applications particulières.

Enfin M. Lippmann a fait voir que le prétendu zéro absolu peut être considéré comme une conception inutile, et que l'échelle des températures absolues n'a pas de zéro.

III.

NOTES ET MÉMOIRES.

1. Sur une expérience de capillarité (*Journal de Physique*, 1871).

2. Relation entre les phénomènes électriques et capillaires (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 1873).

3. Expériences électrocapillaires (*Journal de Physique*, 1874).

4. Sur une propriété d'une surface d'eau électrisée (*Comptes rendus*, 1875).

5. Démonstration élémentaire de la formule de Laplace (*Journal de Physique*, 1876).

6. De l'application des lois de Coulomb aux électrolytes (*Journal de Physique*, 1875).

7. Relations entre les phénomènes électriques et capillaires (Thèse de doctorat, soutenue devant la Faculté des Sciences de Paris, le 24 juillet 1875; Paris, Gauthier-Villars. — *Annales de Chimie et de Physique*, août 1875).

8. Extension du principe de Carnot à la théorie des phénomènes électriques. Équations différentielles générales de l'équilibre et du mouvement d'un système électrique réversible quelconque. (Mémoire présenté à l'Institut; extrait inséré aux *Comptes rendus*, 19 juin 1876.)

9. Des diverses théories données pour expliquer les mouvements du radiomètre de Crookes (*Journal de Physique*, 1876).

10. Sur la mesure de la résistance électrique au moyen de l'électromètre capillaire (*Comptes rendus*, 1876).

11. Sur une propriété d'une surface d'eau électrisée, et sur la polarisation des électrodes (*Journal de Physique*, 1877).

12. Relation entre les propriétés électriques et capillaires d'une surface de mercure en contact avec différents liquides (*Annales de Chimie et de Physique*, 1877, et *Journal de Physique*, même année).

13. De la théorie capillaire de Gauss et de son extension aux propriétés capillaires des lignes liquides (*Journal de Physique*, 1877).

14. Sur la propriété dépolarisante des dissolutions métalliques (*Journal de Physique*, 1879).

15. Action du magnétisme en mouvement sur l'électricité statique; inertie de l'électricité statique (*Comptes rendus*, 1879).

16. Du rôle des écrans magnétiques en mouvement dans les phénomènes d'induction (*Journal de Physique*, 1879).

17. Vérification expérimentale faite par S. Carnot des principes qu'il a découverts (*Journal de Physique*, 1880).

18. Démonstration élémentaire de l'équivalence des actions exercées sur un point magnétique par une surface magnétique et par un courant fermé (*Journal de Physique*, 1879).

19. Sur le choix de l'unité de force dans les mesures absolues (*Comptes rendus*, 1881).

20. Principe de la conservation de l'électricité (*Annales de Chimie et de Physique*, 1881).

21. Méthode expérimentale pour la détermination de l'ohm (*Comptes rendus*, 1881).

22. Méthode thermoscopique pour la détermination de l'ohm (*Comptes rendus*, 1882).

23. Sur la théorie des couches doubles électriques de M. Helmholtz. Calcul de la grandeur d'un intervalle moléculaire (*Comptes rendus*, 1882).

24. Voir le *Bulletin de la Société de Physique* et le *Bulletin de la Société philomathique* pour diverses Communications : notamment dans ce

dernier Bulletin un travail sur la définition physique et l'expression analytique générale des températures absolues.

25. Articles divers dans la *Revue scientifique* (sur le radiomètre; sur les unités absolues) et dans d'autres Recueils scientifiques; nombreux comptes rendus de Mémoires dans le *Journal de Physique*.

8279 PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, QUAI DES AUGUSTINS, 55.